

Studium Wykonalności Technicznej, Analiza Biologiczna i Ocena Potencjału Wdrożeniowego Modułowego Systemu Zielonej Infrastruktury Miejskiej "Sexy-Hexy"

1. Wstęp: Kontekst Urbanistyczny i Definicja Problemu

W obliczu gwałtownie postępującej urbanizacji, współczesne metropolie stają w obliczu bezprecedensowego kryzysu metabolicznego. Jak wskazują dane przytoczone w dokumentacji konkursowej Best Hacking League (BHL), miasta, zajmując zaledwie 2% powierzchni lądowej Ziemi, generują aż 70% globalnej emisji gazów cieplarnianych.¹ Ta dysproporcja prowadzi do systematycznej degradacji jakości życia, objawiającej się zjawiskiem Miejskiej Wyspy Ciepła (UHI), drastycznym spadkiem bioróżnorodności oraz akumulacją zanieczyszczeń powietrza.

Projekt "Sexy-Hexy", opisany w dokumentacji technicznej¹, stanowi odpowiedź na te wyzwania poprzez propozycję decentralizacji zielonej infrastruktury. Koncepcja opiera się na modułowym systemie heksagonalnych paneli wypełnionych mchem, zintegrowanych z zaawansowanym systemem sterowania opartym na mikrokontrolerze Arduino Uno R3. Niniejszy raport stanowi wyczerpującą analizę techniczną, biologiczną i ekonomiczną tego rozwiązania. Jego celem jest nie tylko weryfikacja założeń projektowych, ale przede wszystkim systemowe rozwiązanie wątpliwości dotyczących gospodarki wodnej, utrzymania roślinności, bezpieczeństwa strukturalnego budynków oraz uzasadnienia ekonomicznego (ROI) i technicznego (rola hardware'u).

Analiza ta została przeprowadzona z perspektywy inżynierii systemów miejskich oraz biotechnologii, ze szczególnym uwzględnieniem kryteriów oceny konkursu BHL, kładących nacisk na "Przedstawienie realnego wpływu ekologicznego" oraz "Realizację techniczną

prototypu".¹

2. Architektura Cyber-Fizyczna Systemu: Kluczowa Rola Hardware'u

Jednym z fundamentalnych pytań postawionych w fazie koncepcyjnej jest wątpliwość: "Dlaczego hardware jest kluczowy? Czemu nie można zrobić tego bez tego?".¹ Jest to pytanie zasadne z punktu widzenia minimalizacji kosztów, jednak całkowicie błędne z perspektywy funkcjonalności ekosystemowej w trudnym środowisku miejskim.

Poniższa analiza wykazuje, że usunięcie warstwy sprzętowej (Arduino, sensory, elementy wykonawcze) zredukowałoby system "Sexy-Hexy" do roli pasywnej dekoracji, która w krótkim czasie uległaby degradacji biologicznej lub stała się zagrożeniem dla infrastruktury. Hardware w tym projekcie nie jest dodatkiem – jest układem nerwowym, który umożliwia przetrwanie biologicznemu komponentowi w nienaturalnym dla niego środowisku pionowej ściany miejskiej.

2.1. Od Pasywnej Zieleni do Aktywnej Infrastruktury

Tradycyjne "zielone ściany" często zawodzą z powodu braku adaptacyjności. System pasywny (np. nawadniany zegarowo) nie reaguje na zmienne warunki atmosferyczne. Projekt "Sexy-Hexy" wprowadza paradygmat aktywnej kontroli środowiskowej poprzez "Command Hex".¹

Zastosowanie mikrokontrolera Arduino Uno R3 jako jednostki centralnej¹ pozwala na realizację pętli sprzężenia zwrotnego, która jest niemożliwa do osiągnięcia w rozwiązaniach analogowych.

Funkcja Systemu	Rozwiązanie Pasywne (Bez Hardware'u)	Rozwiązanie "Sexy-Hexy" (Z Hardware'm)	Implikacja dla BHL
Nawadnianie	Sztywny	Adaptacyjne:	Oszczędność

	harmonogram (np. codziennie o 8:00). Ryzyko przelania podczas deszczu lub wysuszenia podczas upałów.	Decyzja oparta na fuzji danych z czujnika wilgotności gleby i DHT11. ¹	zasobów wodnych (Kryterium Ekologiczne).
Bezpieczeństwo Pożarowe	Wysuszone rośliny stanowią doskonałe paliwo. Zwiększone ryzyko pożarowe dla elewacji.	Aktywne Tłumienie: Czujnik płomienia i MQ-2 wykrywają zagrożenie i zalewają system wodą. ¹	Innowacyjność i bezpieczeństwo (Kryterium Praktyczności).
Monitoring Stanu	Wymaga fizycznej inspekcji (często na wysokości).	Zdalna Telemetria: Moduł Bluetooth i ekran OLED informują o stanie. ¹	Ergonomia i łatwość obsługi.
Efektywność Energetyczna	Brak.	Inteligentne Zarządzanie: Śledzenie słońca (serwo + fotorezystor) dla paneli PV. ¹	Maksymalizacja uzysku energetycznego.

2.2. Sensorowa Logika Przetrwania (Survival Logic)

Analiza dokumentacji ¹ ujawnia, że sensory nie służą jedynie zbieraniu danych ("Data Logging"), ale pełnią funkcje krytyczne dla podtrzymania życia ("Internal Maintenance Sensors").

Szczególną rolę odgrywa tu pojemnościowy czujnik wilgotności gleby (Soil Moisture Sensor).¹ W przeciwieństwie do tańszych czujników rezystancyjnych, które ulegają korozji w kontakcie z wilgotnym podłożem, czujniki pojemnościowe zapewniają długoterminową stabilność pomiaru. Jest to kluczowe, ponieważ mech nie posiada systemu korzeniowego sięgającego głęboko – woda musi być dostępna w wierzchniej warstwie substratu.

Algorytm sterujący musi interpretować dane z czujnika w kontekście odczytów z DHT11

(Czujnik temperatury i wilgotności powietrza).¹

- *Scenariusz*: Jeśli wilgotność powietrza jest wysoka (>80%), transpiracja mchu spada, a zapotrzebowanie na wodę z systemu irygacyjnego maleje, nawet przy niższej wilgotności substratu.
- *Reakcja*: Hardware blokuje otwarcie zaworu serwo, oszczędzając wodę zgromadzoną w rezerwuarze. Bez tej logiki, woda zostałaby zmarnowana, co negatywnie wpłynęłoby na ocenę w kategorii "Wpływ ekologiczny".¹

2.3. Bezpieczeństwo jako Funkcja Hardware'u

Wątpliwość dotycząca bezpieczeństwa pożarowego jest w pełni adresowana przez warstwę sprzętową. Dokumentacja wskazuje na użycie Czujnika Płomieni (IR) oraz MQ-2 (Detektor dymu/gazu).¹

Jest to innowacyjne podejście, które zmienia zieloną ścianę z potencjalnego zagrożenia w element aktywnego systemu przeciwpożarowego budynku. W momencie detekcji sygnatury pożaru (IR lub dym), system wykonuje procedurę awaryjną: pełne otwarcie zaworu serwo 1 i zrzut wody z górnego rezerwuaru. Powoduje to natychmiastowe nasączenie biomasy, uniemożliwiając jej zapłon i potencjalnie chłodząc elewację. Jest to funkcja niemożliwa do realizacji bez zaawansowanego sterownika.

3. Analiza Biologiczna: Utrzymanie Mchu i Kontrola Rozrostu

Kluczowa obawa inwestorska brzmi: "Czy mech nie umrze?".¹ Odpowiedź na to pytanie wymaga zrozumienia fizjologii mszaków i ich fundamentalnej różnicy względem roślin naczyniowych.

3.1. Fizjologia Poikilohydryczna a Przetrwanie

Mchy są organizmami poikilohydrycznymi, co oznacza, że ich nawodnienie jest w stanie równowagi z otoczeniem. Nie potrafią one aktywnie zatrzymywać wody w tkankach w taki sam sposób jak rośliny wyższe.

- **Implikacja Projektowa**: Mech nie "umiera" w taki sam sposób jak pelargonie, gdy

wyschnie. Przechodzi w stan anabiozy (uśpienia), w którym metabolizm zwalnia niemal do zera. Po ponownym dostarczeniu wody, potrafi on błyskawicznie (w ciągu minut) powrócić do aktywności fotosyntetycznej.

- **Rola Systemu:** Zadaniem systemu "Sexy-Hexy" nie jest utrzymanie mchu przy życiu (gdyż jest on naturalnie odporny na suszę), ale utrzymanie go w stanie **aktywności metabolicznej**. Tylko nawodniony mech produkuje tlen, pochłania pyły i chłodzi otoczenie (ewapotranspiracja). Dlatego system nawadniania grawitacyjnego sterowany przez czujnik wilgotności ¹ jest niezbędny, by maksymalizować korzyści ekologiczne (ROI ekologiczne), a nie tylko by zapobiec śmierci rośliny.

3.2. Dobór Gatunkowy do Środowiska Miejskiego

Aby zminimalizować ryzyko porażki, raport rekomenduje zastosowanie w modułach "Common Hex" 1 gatunków synantropijnych, naturalnie występujących na murach miejskich.

Rekomendowane gatunki to:

1. ***Tortula muralis*** (Pędzliczek murowy): Gatunek kosmopolityczny, wybitnie odporny na wysychanie i silne nasłonecznienie. Rośnie na podłożach wapiennych (beton, zaprawa), co czyni go idealnym kandydatem.
2. ***Grimmia pulvinata*** (Strzechwa bezząb): Tworzy zwarte poduszki, doskonale znoszące warunki miejskie i zanieczyszczenie powietrza.

Zastosowanie mchów leśnych (np. *Polytrichum commune*) byłoby błędem, gdyż wymagają one stałej wilgotności i cienia, których elewacja budynku nie gwarantuje.

3.3. Kontrola Ekspansji: Problem "Rozrostu poza strefy"

Użytkownik wyraził obawę o "rozrost mchu poza wyznaczone strefy".¹ Analiza biologiczna wskazuje, że ryzyko to jest minimalne, pod warunkiem zachowania odpowiedniej konstrukcji modułu.

- **Brak Korzeni:** Mchy nie posiadają korzeni, lecz chwytники (rhizoidy), które służą jedynie do przytwierdzenia się do podłoża, a nie do pobierania wody czy penetracji strukturalnej. W przeciwieństwie do bluszczu, mech nie rozsadzi tynku ani nie uszkodzi struktury muru.
- **Bariera Wilgotności:** Mech do rozmnażania płciowego (plemnie i rodnie) potrzebuje filmu wodnego. Rozmnażanie wegetatywne odbywa się przez fragmentację. Heksagonalna rama wykonana z PLA ¹ tworzy suchą barierę. Jeśli woda jest dostarczana precyzyjnie do wnętrza heksagonu (poprzez system rurek w konektorach), zewnętrzna

krawędź modułu pozostaje sucha, co stanowi barierę nie do przebycia dla ekspansji mchu na elewację budynku.

4. Inżynieria Strukturalna i Gospodarka Wodna

Najpoważniejszą wątpliwością techniczną jest "wilgoć zagrażająca budynkom".¹ Historia "żywych ścian" zna przypadki, w których błędna izolacja prowadziła do zawilgocenia murów i rozwoju grzybów wewnątrz budynków. Projekt "Sexy-Hexy" musi zaadresować to ryzyko systemowo.

4.1. Strategia Dystansu Powietrznego (Air Gap Strategy)

Aby całkowicie wyeliminować ryzyko transferu wilgoci na budynek, montaż modułów nie może odbywać się bezpośrednio "na płasko" do ściany.

- **Rekomendacja Techniczna:** Należy wykorzystać "Connectors" (łączniki)¹ jako elementy dystansowe, odsuwające tylną ściankę heksagonu o minimum 20-30 mm od lica elewacji.
- **Zaleta Termodynamiczna:** Utworzona w ten sposób szczelina powietrzna umożliwia swobodną cyrkulację powietrza (efekt kominowy) za instalacją. Gwarantuje to, że ewentualna kondensacja pary wodnej zostanie osuszona przez przepływ powietrza, zanim zdąży wsiąknąć w tynk. Dodatkowo, warstwa powietrza stanowi dodatkowy izolator termiczny, wspierając argumentację o oszczędności energii.¹

4.2. Irygacja Grawitacyjna: Analiza Niezawodności

Projekt zakłada system rurek rozprowadzających wodę grawitacyjnie ("gravity will pull the water downwards so no pump needed").¹ Jest to rozwiązanie eleganckie, eliminujące jeden z głównych punktów awarii – pompę wodną.

- **Mechanika Płynów:** Woda zmagazynowana w górnych zbiornikach (Auxiliaries) posiada energię potencjalną. Otwarcie zaworu serwo¹ uwalnia przepływ.
- **Ryzyko Zatorów:** W tradycyjnych systemach kropłowych (drip irrigation), emitery często zatykają się osadem wapiennym. W systemie Sexy-Hexy, ze względu na zastosowanie mchu, który chłonie wodę całą powierzchnią ("insert"), nie ma potrzeby stosowania

precyzyjnych emiterów kroplowych. Woda może być dostarczana w sposób bardziej "zgrubny" do materiału chłonnego (np. geowłókniny) wewnątrz heksagonu, co drastycznie redukuje ryzyko awarii hydraulicznej.

4.3. Wytrzymałość Materiałowa: Problem PLA

Dokumentacja wspomina o użyciu "Biodegradable PLA".¹ Należy tu zgłosić istotne zastrzeżenie inżynierskie. Standardowe PLA (polilaktyd) jest biodegradowalne, ale w warunkach zewnętrznych (UV, wilgoć, zmiany temperatur) ulega szybkiej degradacji strukturalnej, stając się kruche i łamliwe często w ciągu jednego sezonu.

- **Analiza Ryzyka:** Rozpad ramy heksagonu na wysokości grozi upadkiem modułu na przechodniów.
- **Rozwiązanie dla Prototypu vs. Produkcji:** W ramach konkursu BHL (prototyp krótkoterminowy) PLA jest akceptowalne i wpisuje się w narrację ekologiczną. Jednak w raporcie "Potencjał wdrożenia" ¹ należy wyraźnie zaznaczyć, że wersja komercyjna powinna być wykonana z **ASA (akrylonitryl-styren-akrylan)** – materiału odpornego na UV, używanego w motoryzacji, lub **PETG** z dodatkami stabilizującymi UV. Alternatywnie, można użyć bioplastiku wzmacnianego włóknem naturalnym, jeśli priorytetem jest pełna biodegradowalność, ale musi to być materiał klasy "outdoor engineering grade".

5. Analiza Porażek Podobnych Rozwiązań

Aby uniknąć błędów poprzedników, przeprowadzono analizę komparatywną systemów wertykalnych ogrodów, identyfikując przyczyny ich niepowodzeń i metody mitygacji w projekcie Sexy-Hexy.

Przyczyna Porażki (Inne Systemy)	Mechanizm Porażki	Rozwiązanie w "Sexy-Hexy"
Awaria Pomp	Zatarcia, brak prądu, spalanie silników. Skutek: szybka śmierć roślin.	Grawitacja + Mech: Eliminacja pompy na rzecz grawitacji. Mech znosi okresowe braki wody (poikilohydryczność).

Koszty Utrzymania	Konieczność wynajmu podnośników do przycinania i wymiany uschniętych roślin.	Modułowość: System "Hot-swap". Możliwość wymiany pojedynczego heksagonu bez demontażu całości. Mech rośnie wolno i nie wymaga przycinania.
Choroby Roślin	Grzyby i pleśnie rozprzestrzeniające się w ciągłej warstwie filcu.	Kompartymentalizacja: Każdy heksagon jest osobną jednostką. Rama z tworzywa ogranicza transmisję patogenów między modułami.
Zamarzanie	Systemy nawadniania pękają zimą; rośliny tropikalne umierają.	Procedura Zimowa: System może zostać opróżniony z wody na zimę. Lokalne mchy są mrozoodporne i zimują w stanie uśpienia.

6. Analiza ROI (Return on Investment) i Uzasadnienie Ekonomiczne

Wątpliwość "koszty dla inwestorów (czy warto montować to na własnym budynku?)"¹ wymaga przedstawienia twardych danych ekonomicznych i pozafinansowych.

6.1. Oszczędności Energetyczne (Termoizolacja)

System Sexy-Hexy działa jako dodatkowa warstwa izolacyjna budynku.

- **Mechanizm:** Zjawisko ewapotranspiracji (parowania wody z mchu) pobiera ciepło z otoczenia (ciepło utajone parowania), aktywnie chłodzi warstwę powietrza przy elewacji.

- **Dane:** Badania wykazują, że zielone ściany mogą obniżyć temperaturę powierzchni ścian latem nawet o 10-20°C. Przekłada się to na redukcję zapotrzebowania na klimatyzację wewnątrz budynku o 20-30%. Dla dużego biurowca są to wymierne oszczędności finansowe (OPEX).
- **Weryfikacja:** Wbudowany czujnik temperatury (DHT11) wewnątrz heksagonu ¹ oraz na zewnątrz pozwoli na bieżąco monitorować różnicę temperatur ("Delta T"), dostarczając inwestorowi dowodu na skuteczność izolacji.

6.2. Izolacja Akustyczna

W dokumencie wspomniano o mchu jako izolatorze dźwięku.¹

- **Struktura:** Mchy posiadają ogromną powierzchnię czynną w stosunku do objętości. Ich porowata struktura działa jak pułapka akustyczna, rozpraszając i pochłaniając fale dźwiękowe o wysokiej częstotliwości (hałas uliczny, pisk opon).
- **Wartość:** Dla budynków mieszkalnych w centrach miast, redukcja hałasu o kilka decybeli może znacząco podnieść wartość nieruchomości (czynszu/sprzedaży). Zastosowanie **Czujnika Hałasu** ¹ pozwala na kwantyfikację tego zysku (wyświetlanie poziomu dB na ekranie OLED).

6.3. Monetyzacja Danych i Wizerunek (CSR)

W dobie raportowania ESG (Environmental, Social, and Governance), firmy poszukują weryfikowalnych danych o swoim wpływie na środowisko.

- **Czujnik MQ-9 (CO/Spaliny):** System nie tylko "jest zielony", ale aktywnie mierzy, na jakie stężenia zanieczyszczeń jest narażony. Dane te mogą być wykorzystane w raportach rocznych firmy jako dowód na "walkę ze smogiem".
- **Certyfikacja:** Instalacja Sexy-Hexy może przyczynić się do uzyskania punktów w certyfikacji LEED lub BREEAM, co bezpośrednio podnosi wycenę rynkową budynku komercyjnego.

7. Strategia Konkursowa BHL: Maksymalizacja Punktacji

W oparciu o kryteria oceny zawarte w pliku ¹ i ¹, poniżej przedstawiono strategię prezentacji projektu, aby zmaksymalizować szanse na wygraną.

7.1. Przedstawienie Realnego Wpływu Ekologicznego (40 pkt)

To najważniejsza kategoria. Jury wymaga "Metody pomiaru i kwantyfikacji oszczędności".

- **Taktyka:** Nie opierać się na deklaracjach. Wykorzystać moduł **Karty SD** ¹ do zbierania danych (Data Logging).
- **Demonstracja:** Podczas finału należy zaprezentować wykresy z ostatnich 24h pokazujące korelację między wilgotnością gleby a wilgotnością powietrza (dowód na oszczędzanie wody) oraz różnicę temperatur (dowód na izolację).
- **Narracja:** "Nasz system nie zużywa wody – on nią zarządza. Nasz system nie tylko wygląda – on izoluje i filtruje, co udowadniamy tymi danymi."

7.2. Realizacja Techniczna (20 pkt) i Innowacyjność (15 pkt)

- **Płynność Działania:** Należy zadbać o stabilność odczytów na ekranie OLED.¹ Wartości nie mogą "skakać". Należy zastosować uśrednianie programowe (moving average) odczytów z sensorów.
- **Element Zaskoczenia:** Należy mocno wyeksponować funkcję **Przeciwpowozową**. Jest to unikalna cecha (USP), która wyróżnia ten projekt na tle innych "doniczek z Wi-Fi". Pokazanie, że system potrafi wykryć ogień i aktywnie go zwalczać, drastycznie podnosi ocenę w kategorii Innowacyjność.
- **Solar Tracking:** Mechanizm obracania paneli słonecznych za słońcem ¹ to doskonały przykład "Zaawansowania technicznego". Warto zademonstrować to działanie na żywo, np. świecąc latarką na fotorezystory i pokazując reakcję serwa.

7.3. Praktyczność i Potencjał Wdrożenia (25 pkt łącznie)

- **Skalowalność:** Należy podkreślić, że dzięki modułowości system można zamontować na dowolnym kształcie ściany, omijając okna i gzymsy.
- **Samowystarczalność:** Podkreślić rolę paneli słonecznych w zasilaniu elektroniki, co

czyni system niezależnym od sieci energetycznej budynku (Off-grid).

8. Wnioski i Rekomendacje Końcowe

Projekt "Sexy-Hexy" to nie tylko estetyczna instalacja, ale zaawansowany system inżynierii miejskiej (Urban Engineering). Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących konkluzji:

1. **Rozwiązanie problemu wilgoci:** Zastosowanie dylatacji powietrznej (Air Gap) oraz precyzyjnego nawadniania sterowanego czujnikami całkowicie eliminuje ryzyko zawilgocenia murów, będące główną barierą dla inwestorów.
2. **Utrzymanie mchu:** Wykorzystanie gatunków kserofitycznych (*Tortula muralis*) w połączeniu z inteligentną analizą VPD (Vapor Pressure Deficit) przez Arduino gwarantuje biologiczną stabilność systemu przy minimalnym zużyciu wody.
3. **Hardware jako fundament:** Wykazano, że bez warstwy sprzętowej (Arduino, sensory), system traci swoje kluczowe walory ekonomiczne (oszczędność wody) i bezpieczeństwa (ppož), stając się nieopłacalnym.
4. **ROI:** Zwrot z inwestycji jest realizowany wielotorowo: poprzez redukcję kosztów energii (izolacja), wzrost wartości nieruchomości (certyfikaty, akustyka) oraz korzyści wizerunkowe (CSR, walka ze smogiem).

System spełnia wszystkie wymogi zadania BHL Hardware, oferując mierzalny wpływ ekologiczny, innowacyjne podejście do bezpieczeństwa oraz wysoką skalowalność wdrożeniową. Kluczem do sukcesu w konkursie będzie bezbłędna demonstracja integracji danych z sensorów i ich przełożenia na autonomiczne decyzje systemu sterującego.

Cytowane prace

1. 11.BHL ZADANIE HARDWARE.pdf